

Estudio paleosismológico de la Falla de Carboneras: Evidencias tierra-mar de actividad tectónica reciente

Paleoseismological study along the Carboneras Fault: Onshore-Offshore evidences of recent tectonic activity

X. Moreno^{1,2}, E. Masana¹, E. Gràcia², R. Bartolomé² y O. Piqué-Serra^{1,2}

1 Dept. de Geodinàmica i Geofísica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona. 08028 Barcelona

2 Unitat de Tecnologia Marina-CSIC, Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i Ambientals.08003 Barcelona

Resumen: Este trabajo tiene como objetivo establecer el potencial sísmico de la falla de Carboneras (Béticas Orientales) mediante un estudio paleosismológico integrado tierra-mar. El estudio terrestre se ha desarrollado a lo largo del segmento de La Serrata mediante análisis geomorfológico, microtopográfico, apertura de trincheras y datación del material involucrado en la deformación. El estudio marino se ha llevado a cabo mediante técnicas geofísicas de alta resolución, muestreo de sedimentos marinos y datación de estos. Los perfiles sísmicos muestran una gran variación de estructuras a lo largo de la falla. La geometría de las unidades marinas coincide con las observadas en tierra, indicando un movimiento sinistrorso con cierta componente inversa. Tanto en el estudio terrestre como en el marino, se han observado horizontes cuaternarios fallados y depósitos de masa asociados a eventos de deformación (paleoterremotos), demostrando el comportamiento sísmogénico de la falla de Carboneras. En las trincheras se han encontrado evidencias de por lo menos 4 eventos en los últimos 50 ka sugiriendo una recurrencia media mínima de 14 ka. Estructuras holocenas fracturadas datan el último gran terremoto en este segmento de la falla como posterior a 772 AD.

Palabras clave: Falla de Carboneras, Béticas Orientales, paleosismología, neotectónica, fallas lentas.

Abstract: *The aim of this integrated onshore-offshore study is to establish the seismic potential of the Carboneras Fault (Eastern Betics). Onshore, the paleoseismological study was performed along La Serrata segment through geomorphological, microtopographic, trenching and dating analysis across the fault. Offshore, the study was carried out with high-resolution geophysical data, coring and dating analysis. Seismic profiles depict a large variability of structures along the fault zone. Geometry and structure of marine units coincide with onshore structures indicating a left-lateral movement with some reverse component. Both, onshore and offshore studies show faulted Quaternary layers and mass movements deposits related to deformation events (paleoearthquakes). The Carboneras fault is, thus, a seismogenic fault. Trench walls show evidence for a minimum of four events in the last 50 ka suggesting a mean recurrence period of 14 ka. Holocene faulted structures constrain the time of the last earthquake between 772 AD and present time.*

Key words: *Carboneras Fault, Eastern Betics, paleoseismology, neotectonics, slow faults.*

INTRODUCCIÓN

El Sur de la Península Ibérica está caracterizado por la presencia de fallas lentas, con periodos de recurrencia de decenas de miles de años, como es el caso de la falla de Alhama de Murcia (Martínez-Díaz *et al.*, 2001, Masana *et al.*, 2004). Para incluir estas estructuras en el catálogo sísmico y obtener una valoración realista de la peligrosidad sísmica de la región, es necesario analizar sus parámetros sísmicos mediante estudios paleosismológicos. En el 2004 se inició el proyecto IMPULS con el objetivo de evaluar y caracterizar la actividad tectónica cuaternaria de la falla de Carboneras, y evaluar su potencial sísmogénico mediante el análisis de sus parámetros sísmicos (geometría y dimensión, tasa de desplazamiento, período de recurrencia, tiempo del último terremoto y magnitud máxima), tanto en su parte emergida como en la sumergida.

MARCO SISMOTECTÓNICO DE LAS BÉTICAS ORIENTALES

La deformación neógena y cuaternaria producida por el acercamiento de las placas Europea y Africana se acomoda mediante un conjunto de estructuras repartidas en una amplia banda de deformación de dirección E-W (Masana *et al.*, 2004). En las Béticas orientales, la deformación es asimilada por un sistema de fallas de salto en dirección, la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales, generando una actividad sísmica moderada y dispersa (Masana *et al.*, 2004, Stich *et al.*, 2006). La falla de Carboneras con casi 50 km de longitud en tierra y más de 100 km en mar, es una de las estructuras más largas del sistema (Gràcia *et al.*, 2006). La sismicidad de la falla es poco significativa, sin embargo se observan en superficie evidencias geomorfológicas que revelan una actividad tectónica reciente, sugiriendo que

se trate de una falla activa con largos periodos de recurrencia.

LA PARTE EMERGIDA DE LA FALLA DE CARBONERAS

El estudio paleosismológico en tierra se inició mediante un análisis geomorfológico de toda la parte emergida de la falla basado en fotointerpretación y trabajo de campo. Este estudio permitió identificar el área de La Serrata como la zona con mayor número de evidencias de actividad tectónica reciente. En el borde NW de la Serrata se sitúan las 5 zonas donde se han realizado estudios paleosismológicos de detalle.

El análisis paleosismológico en cada zona seleccionada consta de un estudio geomorfológico y microtopográfico previo (mediante estación total), con tal de seleccionar la zona más favorable para la preservación del registro sedimentario de paleoterremotos. Se han abierto un total de 17 trincheras y el material involucrado en la deformación se ha datado mediante radiocarbono (carbón y gasterópodos), U/Th (caliches laminares) y termoluminiscencia (TL) (gravas transportadas bajo exposición solar). De las numerosas muestras datadas, para el estudio paleosismológico se han usado aquellas dataciones coherentes entre si y con el resto de datos geológicos.

En un primer estadio del análisis paleosismológico, se realizaron zanjas perpendiculares a la falla con tal de localizar y analizar las distintas trazas y obtener evidencias de dislocaciones individuales (paleoterremotos). Posteriormente se realizó una excavación 3D, con zanjas paralelas a la falla y cortes sucesivamente más cercanos a la zona de falla, para obtener información sobre el movimiento lateral.

LA PARTE SUMERGIDA DE LA FALLA DE CARBONERAS

En mayo del 2006 se llevó a cabo la campaña de paleosismología marina IMPULS a bordo del BIO Hespérides con el objetivo de caracterizar la estructura y geometría de la parte sumergida de la falla de Carboneras, así como localizar su terminación hacia el sur. Para esto se realizaron un total de 48 perfiles de sísmica multicanal de alta resolución, donde se observa con gran detalle las unidades sismoestratigráficas neógenas, y más de 60 perfiles de sísmica de muy alta resolución TOPAS para caracterizar los primeros metros de sedimento bajo el fondo marino. En paralelo también se obtuvieron datos de batimetría/reflectividad, sísmica monocal, gravimetría y magnetometría.

Para completar el estudio paleosismológico marino, se recogieron nueve testigos de gravedad durante las campañas IMPULS y CARBMED (RV Meteor M69/1, 2006). El objetivo del análisis con testigos marinos es muestrear y datar horizontes identificados en los perfiles TOPAS. Se han medido las propiedades físicas (susceptibilidad magnética, densidad y ondas P) y la granulometría para observar la composición y

estructuras sedimentarias. Mediante dataciones de radiocarbono se obtienen tasas de sedimentación y una cronología de detalle de los horizontes seleccionados.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EN TIERRA

Al pie del Cerro de El Hacho se observa un escarpe morfológico (Fig. 1a) interpretado como escarpe de falla (Moreno *et al.*, 2007). Las trincheras perpendiculares a la falla de esta zona (Fig. 1c) muestran una zona de falla principal (ZF1) que llega hasta superficie, fracturando todas las unidades pleistocenas. También se han identificado depósitos caóticos (B1 y B2) interpretados como cuñas coluviales asociadas a movimientos bruscos de la falla, evidenciando el comportamiento sísmico. En estas trincheras se han identificado un mínimo de 4 eventos. Los dos más antiguos, situados en la base de B1 y B2, han sido acotados mediante dataciones U/Th y TL del material involucrado (Fig.1c), dando al evento E1 una edad entre 54,9 y 32,2 ka BP, y al evento E2 entre 40,9 y 27,1 ka BP. Los eventos E3 y E4 delimitan unidades fracturadas de horizontes inalterados, y en esta trinchera solo han podido ser acotados inferiormente situando a ambos entre 30,8 ka y la actualidad.

Por otra parte, en las zanjas abiertas en paralelo a la ZF1 en la zona de El Hacho (Fig. 1a), se ha observado un paleocanal encajado en la unidad A3.2 y enterrado. Este paleocanal, coincidente en parte con la posición del canal actual en superficie, parece estar desviado al paso por la falla pero también queda fracturado por esta (Fig. 1b). Ya que el canal está encajado en la unidad A3.2, el evento que lo fracturó coincide en el tiempo con el evento E4 de la trinchera TR2 (Fig. 1c). La edad de radiocarbono del canal es de 772-937 AD, lo que permite ajustar la edad del evento E3 entre 30,8 y 1,013 ka BP, y el evento E4 entre 1,178 ka BP y la actualidad.

Se han escavado zanjas en varias terrazas fluviales situadas sobre alguna de las trazas de la falla (zona del barranco de El Hacho, zona del Cerro Blanco y zona de Pecho de los Cristos) con tal de observar depósitos más recientes que los abanicos pleistocenos. No se han encontrado evidencias de deformación en ninguna de estas terrazas. En el caso de la terraza del barranco de El Hacho, las dataciones de radiocarbono han datado la parte inferior de la terraza en 688-889 AD. Pero también se ha observado un depósito caótico, entre la zona de falla y la terraza, aparentemente no fracturado y datado en 614-770AD, es decir, anterior al paleocanal fracturado. Esto podría explicarse, bien por tratarse de una muestra re TRABAJADA, de modo que el depósito sea realmente posterior al paleocanal fracturado y al último evento, o bien por un efecto de relevo lateral de la traza desplazada durante el último evento, de modo que el desplazamiento se sitúe aquí en otra traza paralela.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EN MAR

La identificación de unidades sismoestratigráficas se inició en el perfil IM-11 que pasa por el pozo comercial Almería A-1 y donde quedan definidas las unidades previamente descritas por diversos autores (e.g. Jurado

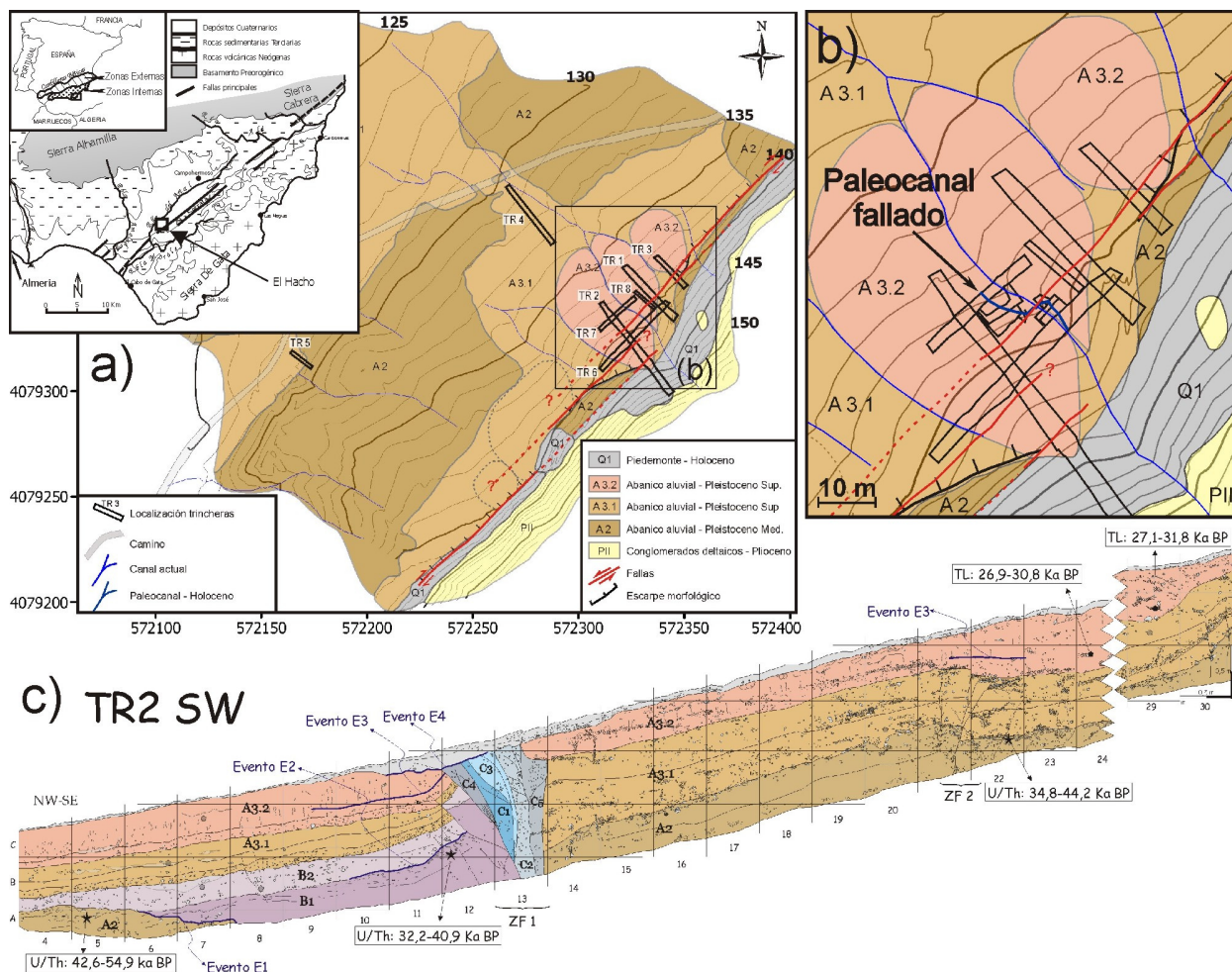


FIGURA 1. a) Mapa microtopográfico de la zona de El Hacho (SO de La Serrata) con las principales unidades sedimentológicas y la posición de las trincheras analizadas. B) Detalle del mapa microtopográfico con la proyección del depocentro del paleocanal observado en las trincheras TR6 y TR7. C) Pared SO de la trinchera TR2. Las unidades A2, A3.1 y A3.2 corresponden a los abanicos aluviales observados en superficie. Las unidades B1 y B2 se han interpretado como cuñas coluviales asociadas al movimiento de la falla. Pueden observarse dos zonas de falla, una principal (ZF1) formada por materiales finos de diversos colores y texturas (C1, C2, C3, C4 y C5) y una zona de falla secundaria (ZF2) más sencilla. La ZF1 rompe hasta superficie, afectando a todas las unidades pleistocenas, pero no al suelo actual. Los horizontes azules delimitan los cuatro paleoeventos sísmicos identificados en esta trinchera. Los recuadros muestran las edades utilizadas para acotar los eventos sísmicos (TL y U/Th).

y Comas, 1992). En la zona de estudio se observan las unidades más someras, hasta el reflector característico M de edad Mesiniense. Gracias a la alta resolución alcanzada en los perfiles de sismica multicanal, se ha podido subdividir estas unidades diferenciando hasta 8 paquetes según sus características reflectivas (Fig. 2a).

Estos perfiles muestran una gran variabilidad de estructuras a lo largo de la zona de falla debida a la interacción entre trazas "en echelon". En la plataforma continental se observan estructuras en flor positivas, seguidas por el segmento N45 donde la falla pasa a ser una traza vertical simple que levanta el bloque SE y bloquea el curso de los Valles Tributarios del Campo de Dalías (Gràcia *et al.*, 2006) (Fig. 2b). En el segmento N60 se observan estructuras compresivas complicadas, como crestas de presión (Fig. 2a) que se atenúan hacia el sur, hasta quedar enterradas por capas inalteradas.

En los perfiles TOPAS se observan las geometrías más superficiales y evidencias de actividad reciente, como escarpes de falla y reflectores desplazados, así como horizontes no deformados que sellan las fallas. Se ha estimado una tasa de desplazamiento vertical a partir

del perfil IM-16 (Fig. 2c), donde resalta un reflector de alta reflectividad desplazado 21 metros en la vertical. Los estudios sedimentológicos de la zona estiman una tasa de sedimentación de 14,2 cm/ka (Bozzano *et al.*, 2007), sugiriendo una edad para dicho reflector de 169 Ka, y una tasa de desplazamiento vertical de 0,14 mm/año para el Cuaternario Superior.

CONCLUSIONES

Depósitos sedimentarios cuaternarios deformados observados en La Serrata (segmento central de la parte emergida de la falla de Carboneras), y a lo largo de los perfiles sísmicos del segmento sumergido, muestran que esta falla ha sido activa durante el Cuaternario reciente.

El carácter transpresivo sinistror de la falla de Carboneras queda evidenciado por las morfologías observadas en superficie, tanto en tierra como en mar, así como por las micro- y macroestructuras observadas mediante trincheras y perfiles sísmicos marinos.

El análisis mediante trincheras en la zona de El Hacho ha permitido identificar depósitos asociados a

movimientos bruscos de la falla, evidenciando un comportamiento sismogénico de la falla de Carboneras. En las paredes de las trincheras se han encontrado evidencias de un mínimo de 4 eventos sísmicos, y las dataciones radiométricas han permitido acotar estos eventos temporalmente: E1 (54,9-32,2 ka BP), E2 (40,9 - 27,1 ka BP), E3 (30,8 - 1 ka BP) y E4 (772 AD y la actualidad). Esto supone un periodo de recurrencia

promedio de 14 ka y un tiempo mínimo transcurrido desde el último evento de 1178 años BP.

Los datos marinos han permitido observar depósitos cuaternarios fracturados y desplazados, proporcionando una tasa de desplazamiento vertical de 0,14 mm/año para el Cuaternario superior. En futuros trabajos, se analizarán los parámetros sísmicos de la falla para largos periodos de tiempo, así como su recurrencia.

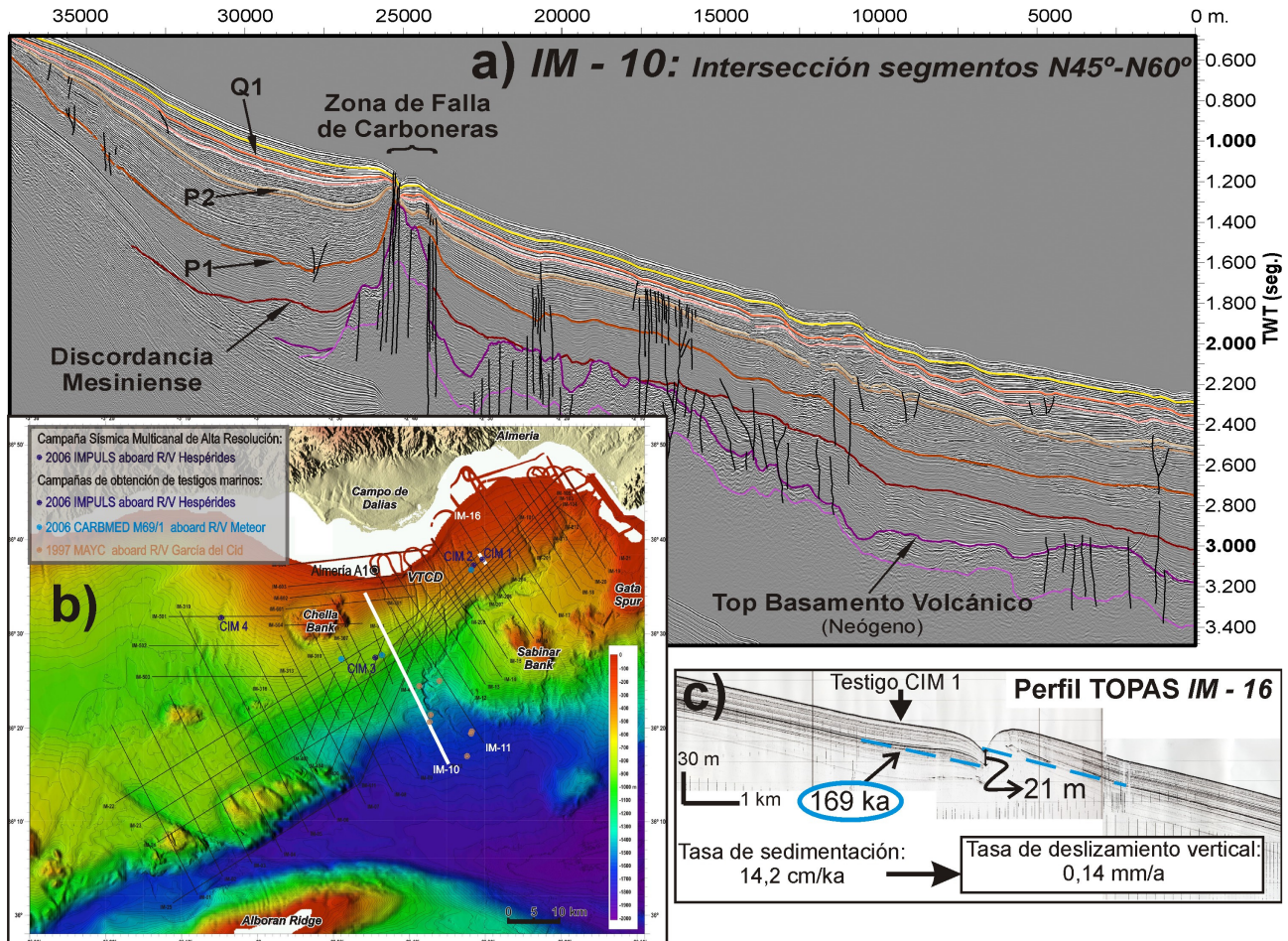


FIGURA 2. a) Perfil IM-10 de sísmica multicanal de alta resolución, localización resaltada en la Fig 2b. Los horizontes coloreados delimitan las unidades sismoestratigráficas identificadas. b) Mapa batimétrico del área de estudio con la localización de los perfiles de sísmica multicanal y TOPAS, testigos de sedimento recuperados durante diversas campañas y el pozo comercial Almería A1. VTCD: Valles Tributarios del Campo de Dalías. c) Perfil de sísmica de muy alta resolución TOPAS, localizado en la Fig.2b donde se observa un reflector de elevada reflectividad desplazado verticalmente, sugiriendo una tasa de desplazamiento vertical de 0,14 mm/año para este segmento de la falla de Carboneras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos IMPULS (REN 2003-05996/MAR), EVENT (CGL2006-12861-C02-00) del MEC, y las acciones complementarias (CGL2004-20214-E), (CTM2004-21203-E), y forma parte del programa Consolider-Ingenio 2010, CSD 2006-0004 "Topo-Iberia".

REFERENCIAS

Bozzano, G., Alonso, B., Ercilla, G., Estrada, F., García, M. (2007, accepted): *Special Volume of the Geol.Soc. of London*.

Gràcia, E., Pallàs, R., Soto, J.J., Comas, M., Moreno, X., Masana, E., Santanach, P., Diez, S., García, M.,

Dañobeitia, J.J. (2006): *Earth and Planetary Science Letters* 241: 734-749.

Jurado, M.J., Comas, M.C. (1992): *Geo-Marine Letters*, 12:129-136.

Martínez-Díaz, J.J.; Masana, E.; Hernández-Henrile, J.L.; Santanach, P. (2001): *Acta Geologica Hispanica* 36, p. 315-327

Masana, E., Martínez-Díaz, J.J., Hernández-Enrile, J.L., Santanach, P. (2004): *Journal of Geophysical Research*, 109: 1-17.

Moreno, X., Masana, E., Gràcia, E., Pallàs, R., Ruano, P., Coll, M., Štepančíková, P., Santanach, P. (2007): *Geogaceta* 41:135-138.

Stich, D., Serpelloni, E., Mancilla, F.L. Morales, J. (2006): *Tectonophysics*, 426 (3): 295-317.